

تراکم‌پذیری منافذ در سنگ‌های کربناته ناهمگن سازند آسماری

عزت‌اله کاظم‌زاده*، مجید نبی‌بیدهندی**، حسام‌الوکی بختیاری* و محمدرضا رضائی***

* پژوهشگاه صنعت نفت صندوق پستی ۱۸۷۴۵-۴۱۶۳

** مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، صندوق پستی ۶۴۶۶-۱۴۱۵۵

*** دانشکده علوم دانشگاه تهران صندوق پستی ۶۴۵۵-۱۴۱۵۵

(دریافت مقاله: ۱۳۸۴/۸/۱۷، پذیرش مقاله: ۱۳۸۴/۱۲/۹)

چکیده

تراکم‌پذیری سنگ‌های مخازن هیدروکربوری یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار بر خواص مخزنی، لرزه‌ای و مکانیکی مخازن هیدروکربوری است. هدف از این مطالعه بررسی تراکم‌پذیری منافذ در سنگ‌های کربناته با تغییرات فشار همه‌جانبه خالص است که در این راستا تأثیر نوع بافت، نوع تخلخل و مقدار تخلخل بر تراکم‌پذیری منافذ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. بدین منظور ۹۰ نمونه کربناته از سنگ مخزن سازند آسماری متعلق به یکی از میداین نفتی جنوب کشور انتخاب شد و پس از مطالعات زمین‌شناسی و تقسیم‌بندی نمونه‌ها بر اساس نوع بافت و نوع منافذ، روابط تراکم‌پذیری بر حسب فشارهای همه‌جانبه خالص برای گونه‌های سنگی سازند آسماری ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: تراکم‌پذیری، سنگ‌های کربناته، مخزن هیدروکربوری، آسماری

۱ مقدمه

به‌طور متداول در صنعت نفت و گاز، معادله گاسمن برای تخمین تأثیر سیالات مختلف روی مدول بالک اشباع به‌منظور تفسیر لاگ‌های صوتی و آنومالی‌های دامنه در داده‌های بازتابی لرزه‌ای استفاده می‌کنند (گاسمن ۱۹۵۱؛ بیوت ۱۹۵۶؛ بیوت و ویلیس ۱۹۵۷؛ براون و کورینگا ۱۹۷۵ و مورفی و همکاران ۱۹۹۳).

$$K_{sat} = K_d + \frac{\alpha^2}{\alpha / K_s + \phi(1/K_f - 1/K_\phi)} \quad (1)$$

که در آن ϕ تخلخل، K_{sat} ، K_d ، K_s ، K_f و K_ϕ به ترتیب مدول‌های بالک اشباع، خشک، قسمت جامد، سیال و منافذ سنگ‌اند و α ضریب بیوت است که به‌صورت $\alpha = 1 - (K_d / K_s)$ تعریف شده است.

K_ϕ^{-1} ، تراکم‌پذیری مؤثر منافذ سنگ است که طبق تعریف، نرخ تغییرات حجم فضای خالی موجود در سنگ به تغییرات فشار خالص همه‌جانبه است و در دو حالت زیر تعریف می‌شود: (روابط ۲ و ۳).

تراکم‌پذیری منافذ سنگ‌های مخازن هیدروکربوری در بخش‌های متفاوت مطالعات مخازن، عاملی مهم و اساسی است. از دیدگاه مهندسی مخزن این عامل یکی از عوامل اصلی تولید طبیعی از مخازن زیر اشباع است و می‌تواند در محاسبات مربوط به اشباع سیالات به‌خصوص میزان ذخیره باقی‌مانده هیدروکربور و نیز برنامه‌ریزی آتی تولید از مخزن تأثیرگذار باشد. همچنین در مطالعات ژئوفیزیکی، با توجه به حساسیت سرعت‌های لرزه‌ای به تغییرات در نوع سیال، فشار منافذ، استرس و اشباع سیالات، بررسی تراکم‌پذیری منافذ به‌منظور به‌کارگیری داده‌های ژئوفیزیکی در تولید از مخازن و فرایندهای ازدیاد برداشت ضروری است. لذا شناخت رفتار تراکم‌پذیری سنگ مخزن نسبت به تغییرات فشار همه‌جانبه خالص در ارزیابی مخازن هیدروکربنی حائز اهمیت است (فشار همه‌جانبه خالص، اختلاف فشار بین فشار خارجی ناشی از وزن طبقات فوقانی و فشار داخلی است که متأثر از فشار سیالات درون منافذ است).

تمام لگاریتمی است.

ماو کو و موکرجی (۱۹۹۵) با اندازه گیری سرعت های لرزه ای، تراکم پذیری منافذ را تعیین کردند و روشن ساختند که تراکم پذیری منافذ ارتباطی بین سرعت های لرزه ای در سنگ های خشک و اشباع و پایه فیزیکی معادله گاسمن (۱۹۵۱) برای جایگزینی سیال است. آنها در نهایت با استفاده از تراکم پذیری منافذ، یک فن ساده گرافیکی برای معادله گاسمن در خصوص هر نوع کانی و سیال موجود در منافذ ارائه کردند.

به منظور کاهش عدم قطعیت در تخمین مدول بالک سنگ اشباع با معادله گاسمن اندازه گیری دقیق تراکم پذیری مؤثر منافذ از اهمیت ویژه ای برخوردار است. مقدار تراکم پذیری منافذ به نوع کانی ها و اجزای تشکیل دهنده سنگ و بافت آن بستگی دارد. به لحاظ تنوع بافتی در مخازن کربناته، تعیین پارامتر تراکم پذیری منافذ برای گونه های مختلف سنگ کربناته ضروری است.

در این بررسی به منظور تعیین تراکم پذیری منافذ سنگ مخزن ناهمگون کربناته آسماری در یکی از میداین نفتی کشور، تعداد ۹۰ نمونه از گونه های مختلف سنگ کربناته از سه چاه متفاوت انتخاب شده و تأثیر بافت، نوع تخلخل و مقدار تخلخل بر تراکم پذیری منافذ مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

۲ پتروگرافی

نمونه های انتخاب شده برای بررسی تراکم پذیری، کربناته و متعلق به سازند آسماری اند و از سه چاه متفاوت از یکی از میداین نفتی واقع در جنوب ایران گردآوری شده اند. مطالعه مقاطع نازک میکروسکوپی این نمونه ها نشان می دهد که همه نمونه ها تمیز (بدون شیل) اند و بر اساس طبقه بندی دانه های (۱۹۶۲) برای نوع بافت به ترتیب فراوانی شامل: دولوستون، پکستون، دولوپکستون، دولوکستون، دولومادستون، وکستون، دولستون ماسه ای و مادستون

$$\frac{1}{K_{\phi}} = - \frac{1}{V_p} \frac{\partial V_p}{\partial V_{\sigma}} \Big|_P \quad (2)$$

که در آن K_{ϕ}^{-1} تراکم پذیری مؤثر منافذ در شرایطی است که فشار داخلی (P) ثابت می ماند و فقط فشار همه جانبه خارجی (σ) افزایش می یابد.

$$\frac{1}{K_{\phi}} = - \frac{1}{V_p} \frac{\partial V_p}{\partial P} \Big|_{\sigma} \quad (3)$$

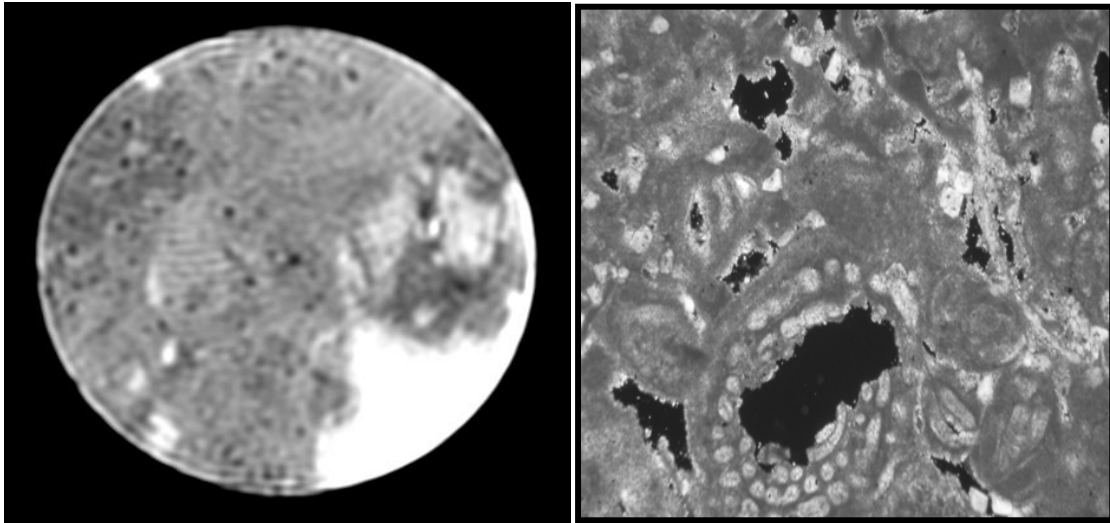
که در آن K_{ϕ}^{-1} تراکم پذیری منافذ در شرایطی است که فشار خارجی (σ) ثابت است و فشار داخلی (P) تغییر می کند.

تحقیقات نیومن (۱۹۷۳) در ارتباط با تراکم پذیری منافذ روشن ساخت که در ماسه سنگ های متراکم، تغییرات تراکم پذیری منافذ بر حسب تغییرات در تخلخل نسبت به سنگ های آهکی، ماسه سنگ های شکننده و ماسه سنگ های نامتراکم تفاوت فاحش دارند. ایشان اظهار می دارند که ممکن است همبستگی خوبی بین تراکم پذیری و تخلخل اولیه برای ماسه سنگ ها و سنگ های آهکی با خواص زمین شناسی یکسان وجود داشته باشد. همچنین گرینولد و همکاران (۱۹۸۱) مدلی برای تراکم پذیری حجم منافذ در ماسه سنگ ها عرضه کردند. آنها با استفاده از داده های آزمایشگاهی تخلخل اولیه، مقدار شیل، فاکتور شکل منافذ، مشخصات درزه ها، نوع کانی ها و مدول های بالک آنها و مدلی برای تخمین تراکم پذیری منافذ سنگ بر حسب فشار همه جانبه مربوط به سه نوع ماسه سنگ معرفی کردند.

حراری و همکاران (۱۹۹۵) تحقیقاتی آزمایشگاهی روی تراکم پذیری منافذ نمونه های آهکی مخزنی نفتی واقع در عربستان سعودی صورت دادند. آنها با اعمال فشار همه جانبه تا ۴۵۰۰ (پوند بر اینچ مربع) بر نمونه های استوانه ای از مغزه، تراکم پذیری منافذ سنگ را تعیین کردند. نتایج حاصل بیانگر ارتباط خطی منفی بین تراکم پذیری منافذ و فشار همه جانبه خالص روی نمودار

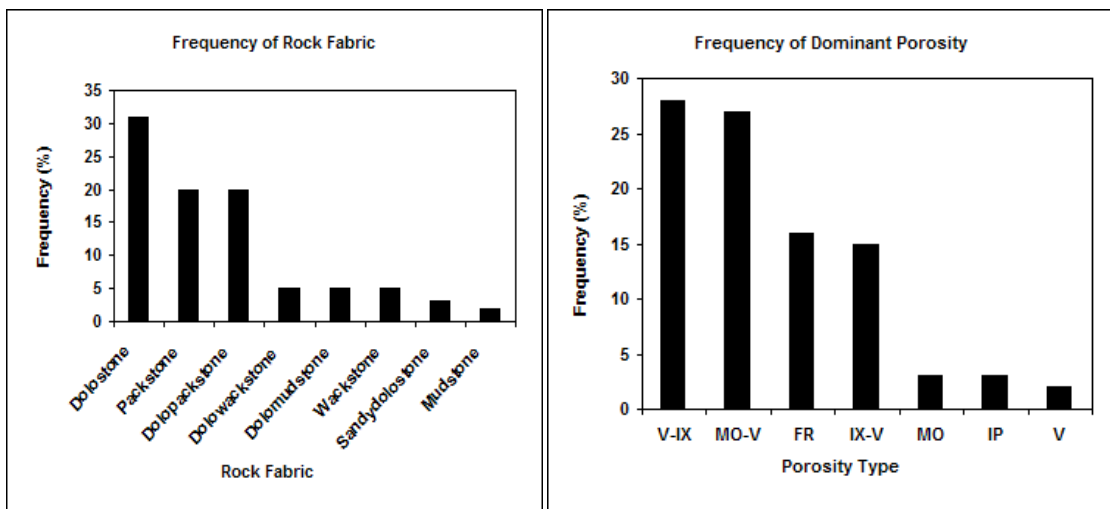
قابل رویت‌اند. تخلخل حفره‌ای، به صورت متصل یا غیر متصل در اکثر سنگ‌های کربناته دیده می‌شود. سایر انواع تخلخل مشاهده شده در نمونه‌های مورد مطالعه به ترتیب فراوانی شامل قالبی (M)، بین کریستالی (IX)، بین دانه‌ای (IP) و درزه (FR) اند. شکل‌های ۳ و ۴ فراوانی انواع بافت‌ها و تخلخل‌های موجود در نمونه‌ها را نشان می‌دهند.

هستند. همچنین بررسی‌های مقاطع نازک به همراه تصاویر سی تی اسکن نمونه‌ها نشان داد که بر اساس طبقه‌بندی چوکت و پری (۱۹۷۰) تخلخل حفره‌ای (V) (شکل‌های ۱ و ۲) فراوان‌ترین نوع تخلخل در نمونه‌ها است که خود از مهم‌ترین نوع تخلخل‌ها در کربنات‌ها به شمار می‌روند. این نوع از تخلخل معمولاً منافذ بی‌قاعده بزرگی‌اند که طول چندانی ندارند و با چشم غیر مسلح



شکل ۱. تصویر مقطع نازک دولوپکستون با تخلخل حفره‌ای و قالبی با بزرگ‌نمایی ۱۰۰.

شکل ۲. تصویر سی تی اسکن نمونه با بافت دولوستون شامل کانی دولومیت با تخلخل حفره‌ای و قالبی.



شکل ۳. فراوانی انواع تخلخل‌های موجود در نمونه‌ها.

شکل ۴. فراوانی انواع بافت‌های موجود در نمونه‌ها.

۳ شرح آزمایش

آزمایش تراکم‌پذیری با توسط دستگاه پیشرفته Overburden Rig صورت گرفته است. با این دستگاه علاوه بر اندازه‌گیری تراکم‌پذیری منافذ، می‌توان مقاومت الکتریکی نمونه‌های اشباع از سیال مخزن را در شرایط فشار مخزن اندازه‌گیری کرد. محفظه مغزه نگهدار این دستگاه، سه‌محوره است و می‌توان با آن فشار همه‌جانبه مساوی (فشار هیدرو استاتیک) تا ۱۰۰۰۰ (پوند بر اینچ مربع) را به نمونه مغزه به قطر ۱/۵ اینچ اعمال کرد.

به منظور اندازه‌گیری تراکم‌پذیری منافذ ابتدا تخلخل نمونه‌ها با استفاده از دستگاه Ultraporosimeter 200A اندازه‌گیری شده است. در این دستگاه حجم قسمت جامد سنگ با تزریق هلیوم به نمونه و با استفاده از قانون بویل محاسبه شد و با دانستن حجم کل نمونه، مقدار تخلخل به دست آمد. سپس نمونه‌ها با آب سازندی اشباع شد و میزان حجم فضای منافذ در این حالت با استفاده از وزن نمونه در حالت‌های خشک و اشباع و چگالی سیال اشباع کننده تعیین شد. در مرحله بعد نمونه صد در صد اشباع شده درون محفظه مغزه‌نگهدار دستگاه قرار داده شد و بعد از اینکه بخش‌های دستگاه شامل محفظه مغزه‌نگهدار، مسیرهای جریان سیال و شیرهای کنترل هواگیری شدند، به منظور اطمینان از اشباع کامل نمونه چند برابر حجم منافذ سنگ، سیال به نمونه تزریق شد. با عبور سیال از نمونه و ایجاد تعادل در سامانه، فشار همه‌جانبه وارد بر نمونه به صورت مرحله‌ای از ۴۳۵ تا ۴۰۰۰ (پوند بر اینچ مربع) افزایش یافت. افزایش فشار همه‌جانبه خالص در هر مرحله عامل تراکم سنگ و در نتیجه خروج سیال از نمونه است که میزان حجم سیال خروجی از نمونه، نشانگر میزان کاهش حجم فضای خالی موجود در نمونه به واسطه افزایش فشار همه‌جانبه است. در این آزمایش فشار منفذی (فشار داخلی) ثابت و معادل فشار جو است.

با رسم منحنی لگاریتم نپرین حجم منافذ ($\ln(V_p)$)

در مقابل فشار همه‌جانبه خالص و با مشتق‌گیری در هر نقطه میزان تراکم‌پذیری منافذ تعیین شده است.

۴ بحث و نتیجه‌گیری

به منظور مطالعه تراکم‌پذیری منافذ در شرایط فشار هیدرواستاتیک و بررسی تغییرات آن با تغییر فشار همه‌جانبه خالص، ۵ مرحله افزایش فشار برای هر نمونه در نظر گرفته شد که عبارت‌اند از ۴۳۵، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰ و ۴۰۰۰ (پوند بر اینچ مربع). در شکل ۵ تراکم‌پذیری نمونه‌ها در فشار ۳۰۰۰ (پوند بر اینچ مربع) در مقابل تخلخل اولیه نمونه ترسیم شده است و نشان می‌دهد که تراکم‌پذیری منافذ، تابع اندازه تخلخل است، به گونه‌ای که با کاهش میزان تخلخل، تراکم‌پذیری افزایش می‌یابد. با استفاده از این منحنی سه محدوده تخلخل کمتر از ۵ درصد، ۵ تا ۱۵ درصد و بیش از ۱۵ درصد برای بررسی تأثیر بافت سنگ روی تراکم‌پذیری منافذ انتخاب شد.

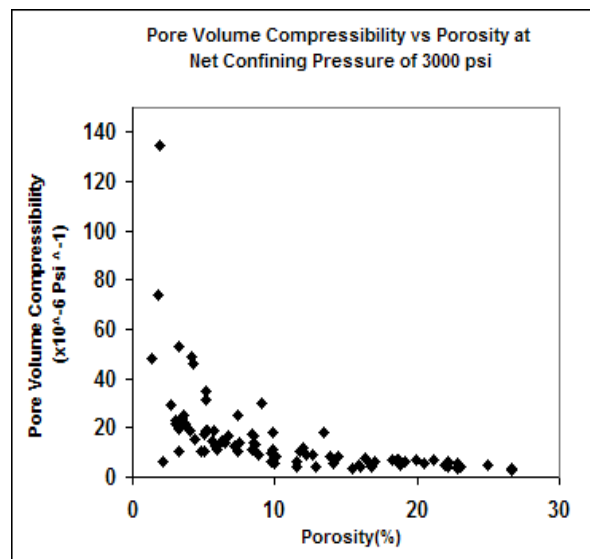
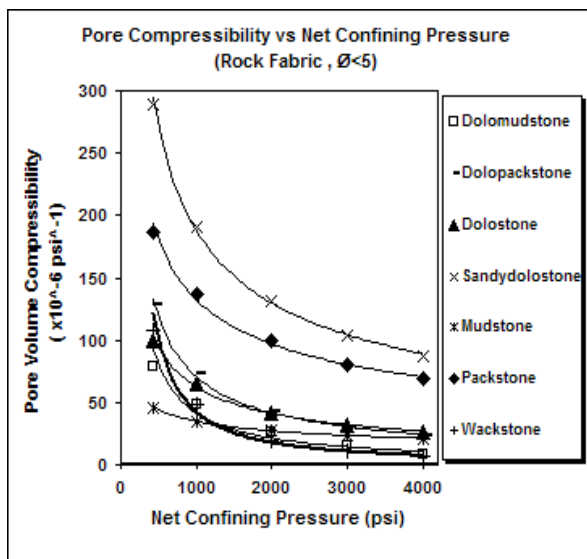
شکل‌های ۶ تا ۸ تغییرات متوسط تراکم‌پذیری منافذ نمونه‌ها نسبت به تغییرات فشار همه‌جانبه خالص را برای بافت‌های مختلف به ترتیب در محدوده تخلخل‌های ذکر شده نمایش می‌دهند. تابع توانی به شکل $Y = aX^b$ عموماً بهترین برازش را برای ارتباط بین مدول‌های کشسان و فشار مؤثر نشان می‌دهد (ژانگ و همکاران ۱۹۹۰ و حراری و همکاران ۱۹۹۵). در شکل‌های ۶ تا ۸ نیز برای بافت‌های مختلف تابع توانی بهترین برازش را بر داده‌ها داشته است و نتایج مربوطه برای تخلخل کمتر از ۵ درصد و تخلخل ۵ تا ۱۵ درصد، به ترتیب شامل ضرایب تابع توانی (a,b) و ضریب همبستگی (R^2) در جدول‌های شماره ۱ و ۲ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بیشترین مقدار تراکم‌پذیری در هر دو حالت، مربوط به دولومیت‌های ماسه‌ای است. همچنین با افزایش میزان خمیره نسبت به دانه در سنگ (تغییر بافت از پکستون به مادستون) مقدار تراکم‌پذیری منافذ کاهش

جدول ۱. ضرایب و ضریب همبستگی برازش تابع توانی برای بافت‌های مختلف و تخلخل کمتر از ۵ درصد.

بافت سنگ	a	b	R ²
دولوستون ماسه‌ای	7676.8	-0.5371	0.999
پکستون	3014.5	-0.4525	0.993
دولوپکستون	13607.0	-0.7620	0.997
دولوستون	4021.6	-0.6029	0.995
دولومادستون	31494.0	-0.9692	0.958
مادستون	399.5	-0.3535	0.999
وکستون	275627.0	-1.2713	0.988

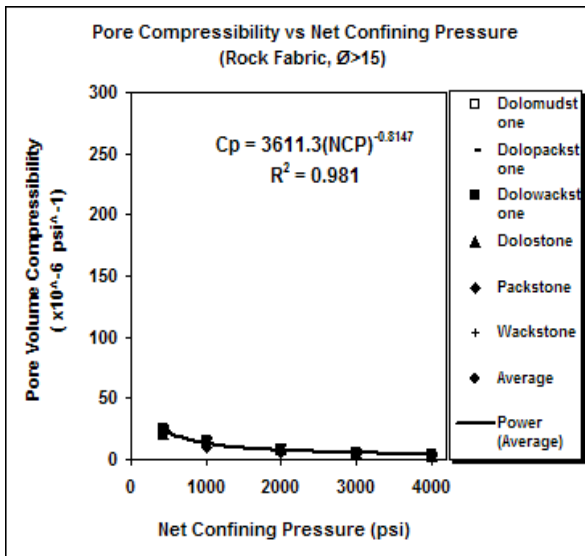
جدول ۲. ضرایب و ضریب همبستگی برازش تابع توانی برای بافت‌های مختلف و تخلخل بین ۵ تا ۱۵ درصد.

بافت سنگ	a	b	R ²
دولوستون ماسه‌ای	13983.0	-0.6548	0.999
پکستون	39760.0	-0.8424	0.917
وکستون	249856.0	-1.2439	0.739
دولوپکستون	23962.0	0.9586	0.971
دولوستون	6999.5	0.8160	0.932
دولوپکستون	366.4	0.3736	0.998
مادستون	5691.9	-0.8237	0.997

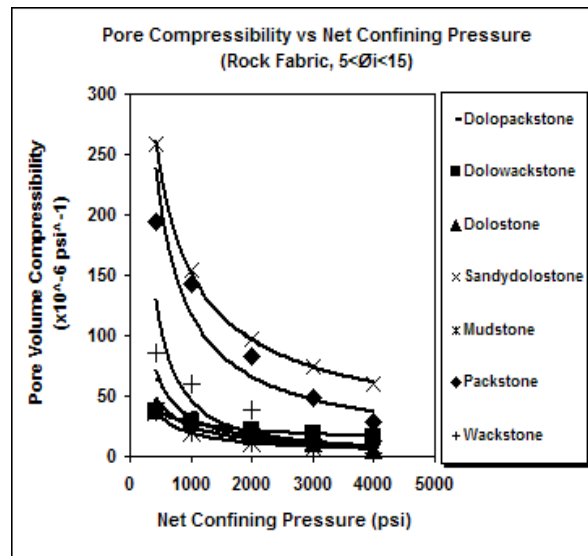


شکل ۵. تراکم‌پذیری منافذ در فشار ۳۰۰۰ (psi) برحسب تخلخل اولیه.

شکل ۶. تراکم‌پذیری منافذ بر حسب فشار همه‌جانبه برای بافت‌های مختلف و تخلخل کمتر از ۵ درصد.



شکل ۸. تراکم‌پذیری منافذ بر حسب فشار همه‌جانبه برای بافت‌های مختلف و تخلخل بیشتر از ۱۵ درصد.



شکل ۷. تراکم‌پذیری منافذ بر حسب فشار همه‌جانبه برای بافت‌های مختلف و تخلخل بین ۵ تا ۱۵ درصد.

۵ نتیجه‌گیری

۱. تراکم‌پذیری منافذ تابعی از مشخصات زمین‌شناسی نمونه‌ها، از جمله بافت و نوع تخلخل است.
۲. مقدار تراکم‌پذیری منافذ به مقدار تخلخل بستگی دارد، به گونه‌ای که با افزایش تخلخل، میزان تراکم‌پذیری منافذ کاهش می‌یابد. به عبارتی تراکم‌پذیری منافذ در نمونه‌های با تخلخل کم، بیشتر است و بنابراین در مخازن با مقدار تخلخل‌های کم، صرف‌نظر کردن از عامل تراکم‌پذیری ممکن است منجر به خطای زیادی شود.
۳. تابع‌نمایی به صورت $Y = ax^b$ بهترین برازش را برای ارتباط بین تراکم‌پذیری منافذ با فشار همه‌جانبه خالص دارد.
۴. در سازند مورد بررسی، تراکم‌پذیری منافذ در تخلخل‌های کمتر از ۱۵ درصد در بافت دولوستون ماسه‌ای بیشتر از سایر بافت‌های کربناته موجود بوده

می‌یابد. در تخلخل‌های بیش از ۱۵ درصد تغییرات تراکم‌پذیری منافذ نسبت به تغییر فشار همه‌جانبه خالص وابستگی کمتری به بافت سنگ دارد، به گونه‌ای که می‌توان معادله زیر را در حکم میانگین برای همه بافت‌ها در نظر گرفت.

$$C_p = 3611.3(NCP)^{-0.8147} \quad (۴)$$

$$R^2 = 0.981$$

که در آن C_p تراکم‌پذیری منافذ و NCP فشار همه‌جانبه خالص است.

شکل ۹ اثر تخلخل قالب در سنگ را روی تراکم‌پذیری منافذ نشان می‌دهد. هر منحنی بیانگر مقدار میانگین تراکم‌پذیری برای تخلخل قالب موردنظر است. بیشترین مقدار تراکم‌پذیری در نمونه‌های با تخلخل حفره‌ای (V) است و کمترین مقدار تراکم‌پذیری در نمونه‌هایی است که تخلخل قالب در آنها از نوع بین دانه‌ای (IP) و بین کریستالی (IX) است.

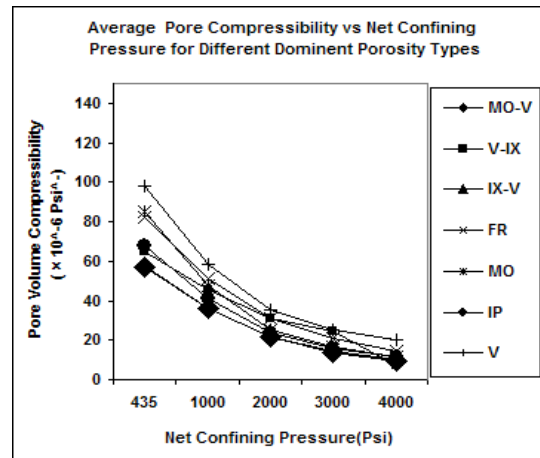
منابع

- Biot, M. A., 1956, Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid. I. Low-frequency rang: J. Acoust. Soc. Amer., **28**, 168-178.
- Biot, M. A., and willis, D. C., 1957, The elastic coefficients of the theory of consolidation: J. Appl. Mech. ASME, **24**, 594-601.
- Brown, R. J. S., and Korringa, J., 1975, On the dependence of the elastic properties of a porouse rock on the compressibility of the pore fluid: Geophys., **40**, 4, 608.
- Choqutee, P. W., and Pray, L. C., 1970, Geological nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates: Bull., AAPG, **54**, 207-250.
- Gassmann, F., 1951, Über die elastizität poröser medien: Veierteljahrsschrift der Natur Gesellschaft in zörich, **96**, 1-23.
- Dunham, R. J., 1962, Classification of carbonate rocks according to their depositional texture, In E. Ham, 108-121.
- Greenwald, R. F., Hart, H., and Somerton, W. H., 1981, A theoretical model for determination of pore volume compressibility of consolidated sandstone, SPE, 10076, 1-13.
- Harari, Z., Wang, S., and Saner, S., 1995, Pore compressibility study of Arabian carbonate reservoir rocks, SPE, 27625, 1-31.
- Murphy, W., Reischer, A., and Hsu, k., 1993, Modulus decomposition of compressional and shear velocities in sand bodies, Geophys., **58**, 227-239.
- Mavko, G., and Mukerji, T., 1995, Seismic pore space compressibility and Gassmann's relation, Geophys., **60**, 1743-1749.
- Newman, G. H., 1973, Pore volume compressibility of consolidated, friable, and unconsolidated reservoir rocks under hydrostatic loading, JPT, 129-134.
- Zheng, z., McLennan, J., and Jones, A., 1990, Pore volume compressibility under different stress conditions, Proceedings, SCA 4th Annual Technical Conference, Paper No. 9005.

است و با تغییر بافت از پکستون به مادستون میزان تراکم‌پذیری منافذ کاهش می‌یابد.

۵. در محدوده تخلخل‌های بیش از ۱۵ درصد در سازند مورد مطالعه، بافت سنگ تأثیر چندانی در تراکم‌پذیری نداشت و می‌توان از معادله میانگین ارائه شده، تراکم‌پذیری منافذ را برای همه بافت‌های آن تعیین کرد.

۶. در بین تخلخل‌های قالب موجود در نمونه‌های مورد بررسی، سنگ‌های با تخلخل حفره‌ای، دارای بیشترین مقدار تراکم‌پذیری منافذ و سنگ‌ها با تخلخل بین دانه‌ای و بین کریستالی کمترین تراکم‌پذیری منافذ را نشان می‌دهند.



شکل ۹. تراکم‌پذیری منافذ بر حسب فشار همه‌جانبه برای انواع تخلخل.

تشکر و قدردانی

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از مرکز مطالعات اکتشاف و تولید پژوهشگاه صنعت نفت به سبب فراهم آوردن امکانات این پژوهش کمال تشکر را داشته باشند. همچنین از پرسنل واحد پژوهش مغزه‌های نفتی پژوهشگاه صنعت نفت تشکر و قدردانی می‌شود.